

20

Fecha de presentación: Mayo, 2024
Fecha de aceptación: Octubre, 2024
Fecha de publicación: Noviembre, 2024

METODOLOGÍA

PARA LA RE-MOTORIZACIÓN DE VEHÍCULOS PESADOS. ESTUDIO DE CASO

METHODOLOGY FOR THE RE-MOTORIZATION OF HEAVY VEHICLES. CASE STUDY

Jesús E. Junco García ^{1*}

E-mail: jejunco@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6713-9440>

José Ramón Fuentes Vega ¹

E-mail: jfuentes@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7321-8903>

Juan Bautista Cogollos Martínez ¹

E-mail: jcogollos@yahoo.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4340-5705>

Víctor Millo Carmenate ¹

E-mail: vmillo@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4340-5705>

¹ Universidad de Cienfuegos, "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

*Autor para correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Junco García, J. E., Fuentes Vega, J. R., Cogollos Martínez, J. B., & Millo Carmenate, V. (2024). Metodología para la re-motorización de vehículos pesados. Estudio de caso. *Universidad y Sociedad*, 16(6), 199-211.

RESUMEN

La eficiencia energética en el transporte de cargas y pasajeros por carretera, es un requisito imprescindible para el logro de la rentabilidad del proceso de transportación. Ante el deterioro de los parámetros que definen el desempeño vehicular con el desarrollo de períodos prolongados de explotación, la remotorización se erige como una de las medidas que posibilitan alcanzar parámetros de salida semejantes a los originales y elevar el desempeño a planos superiores.

Para lograrlo se requiere, evaluar las propuestas de remotorización con indicadores que muestren de modo fehaciente la incidencia del motor propuesto en los indicadores de salida y una metodología que condense los pasos fundamentales para lograrlo.

El objetivo de este artículo es mostrar lo anterior a partir de un estudio de caso.

Palabras clave: Desempeño vehicular, Cualidades cinemáticas, Dinámicas y de consumo, Relación motor-sistema de transmisión, Eficiencia energética.

ABSTRACT

Energy efficiency in the transportation of cargo and passengers by road is an essential requirement for achieving profitability in the transportation process. Given the deterioration of the parameters that define vehicle performance with the development of prolonged periods of operation, re-motorization stands as one of the measures that makes it possible to achieve output parameters similar to the originals and raise performance to higher levels.

To achieve this, it is required to evaluate the re-motorization proposals with indicators that reliably show the impact of the proposed engine on the output indicators and a methodology that condenses the fundamental steps to achieve it. The objective of this article is to show the above based on a case study.

Keywords: Vehicle performance, Kinematic, Dynamic and consumption qualities, Engine-transmission system relationship, Energy efficiency.

INTRODUCCIÓN

El mundo enfrenta un crecimiento extraordinario de su población y de su demanda de energía. Solo el sector transporte consume alrededor de 2.500 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MTEP), casi un tercio del consumo final de energía mundial, abastecido principalmente por derivados de petróleo (Trentadue & Carranza, 2014). De igual modo, también aumentan los problemas causados por contaminación, especialmente en los centros urbanos, donde cada vez más, el tráfico ocupa más espacio físico. La contaminación del aire tiene su causa en la concentración de sustancias nocivas en la atmósfera, las cuales causan daños a la salud humana, animal y vegetal (Tamayo Pacheco, 2014).

Se impone el logro de una mayor eficiencia energética en el transporte automotor, que puede lograrse, entre otros, con el uso de vehículos con tecnología avanzada; con la optimización en el uso de los modos de transporte; con el mejoramiento vial y la gerencia del tránsito y con la renovación de la flota en uso o en su defecto, la remodelación de la misma. Dentro de la remodelación, resalta la remotorización como la de más frecuente empleo.

Mejorar la eficiencia de funcionamiento de un vehículo con la remotorización, implica lograr parámetros de salida similares o mejores a los iniciales, para lo cual se requiere de una evaluación, lo más integral posible, de las variantes de remotorización, de modo que se garanticen adecuados indicadores de desempeño del vehículo remodelado, sin afectar la seguridad de su movimiento.

Nuestra institución trabaja en el desarrollo de una metodología de remotorización vehicular, en un inicio dirigida a los vehículos pesados. Aún no está concluida, pero se aplica en el análisis de variantes de remotorización con buenos resultados. En sentido general, se enfoca a la comparación de los siguientes aspectos, entre el vehículo con motor original y el posible vehículo remodelado (Pazos, 2022): 1).-Análisis de los parámetros de salida de los motores y de sus indicadores de elasticidad; 2).-Su característica exterior de velocidad; 3).-La característica tractiva del vehículo y los indicadores que evalúan la relación motor-sistema de transmisión; 4).-El análisis del comportamiento del consumo de combustible en los regímenes más adecuados de movimiento en las marchas superiores en diferentes variantes de composición; 5).-Principales indicadores cinemáticos y dinámicos de la máquina automotriz; 6).-Valorar posibles afectaciones en las cualidades de estabilidad y frenado; 7).-Desarrollar cálculos de resistencia de materiales, si fuera necesario (Huang et al, 2014).

Generalmente las remotorizaciones no llevan implícita la necesidad de cálculos de estabilidad ni de frenado, pues no afectan sensiblemente las coordenadas del centro de gravedad, mucho menos en vehículos pesados. Si existe una adecuada relación entre los parámetros de salida del motor original y el propuesto, no deben incrementarse sensiblemente las posibilidades de traccionar remolques de mayor peso total o alcanzar velocidades muy superiores a la del vehículo original (Pérez, 2022).

Los datos que están estipulados para el desarrollo del trabajo son los siguientes:

Del vehículo: Tipo de vehículo, marca, modelo, fórmula de ruedas y chapa (se exige por autoridades del tránsito). Peso del vehículo cargado y del remolque, si existiera. Pudiera ser de interés el peso del vehículo descargado o peso propio. Dimensiones (altura, vía y batalla y dimensiones del neumático).

Del motor original y motor propuesto para la remotorización: Tipo de motor, marca, modelo. Su potencia máxima, el torque máximo, y las frecuencias de rotación a que se alcanzan ambas; peso del motor y consumo específico a potencia máxima. Si fuera posible sus dimensiones. Número de serie del motor original y del utilizado en la remodelación (se exige por autoridades del tránsito).

Relaciones de transmisión: las de la caja de velocidad, transmisión principal y caja de transferencia si existiera. Si la remodelación contempla la sustitución de partes del sistema de transmisión, hay que agregar las relaciones de transmisión del conjunto que se introduce en la remodelación.

MATERIALES Y MÉTODOS

La remodelación objeto de estudio se realiza manteniendo intacto el sistema de transmisión del vehículo original. El motor IVECO Cursor 13, del vehículo original, posee control electrónico de la inyección. Una mayor exactitud en la dosificación, con elevadas presiones de inyección, garantiza alta calidad de la combustión y elevados indicadores de desempeño. Este motor se diferencia notoriamente de los motores convencionales, pues en un rango amplio de frecuencias de rotación posee momento torsor máximo constante y en otro contiguo, potencia máxima constante. El Weichai 615.44, propuesto para la remodelación, es un motor diésel, que trabaja con bomba de alta presión convencional y accionamiento mecánico de los inyectores. No posee, por tanto, los adelantos tecnológicos de los motores con control electrónico de la inyección, pero es un motor moderno y se encuentra disponible.

No hay diferencias significativas, ni en peso ni en dimensiones, entre ambos motores. Incluso la remotorización se

produce utilizando los mismos puntos de apoyo, y sólo sustituyendo los calzos del motor antiguo por los del motor propuesto, sin necesidad de estructuras adicionales. Por tal razón, no se requieren cálculos de comprobación de resistencia de materiales en tal sentido.

Los datos del vehículo original y del motor propuesto para remodelación se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Datos generales del vehículo original y el motor propuesto.

Datos generales del vehículo original	
Marca y modelo de camión cuña	IVECO Cursor
Fórmula de ruedas	6x4
Marca y modelo del motor diésel Common Rail	Cursor 13
Potencia máxima en ficha técnica del fabricante (N _{emáxfab}), kW/rpm	353/(1530-2500)
Torque máximo en ficha técnica del fabricante (M _{emáxfab}), N.m/rpm	2200/(1000-1550)
Peso del motor, kg	937
Norma de ensayo utilizada en pruebas de banco	SAE
Consumo específico de combustible a potencia máxima (geN), g/kW.h	198
8 relaciones de transmisión	0.0725; 0.1054; 0.1531; 0.2188; 0.3311; 0.4808; 0.6993; 1.0000
Relación de transmisión del puente motriz (im)	0.1789
Peso total del conjunto (G), N (con carga útil de 30t)	449101.8
Número de ruedas del remolque	12
Diámetro de la llanta (Do), plg	22.5
Ancho del perfil del neumático (bo), plg	11
Vía (B), m	2.0
Altura total (H), m	3.9
Motor propuesto para la re-motorización	
Marca y modelo de motor diésel convencional	Weichai 615.44
Potencia máxima en ficha técnica del fabricante (N _{emáxfab}), kW/rpm	236/2200
Torque máximo en ficha técnica del fabricante (M _{emáxfab}), N.m	1250/(1400-1600)
Peso del motor, kg	909.92
Norma de ensayo utilizada en pruebas de banco	ISO
Consumo específico de combustible a potencia máxima (geN), g/kW.h	218

Fuente: Elaboración propia.

1).-Análisis de los parámetros de salida de los motores y de sus indicadores de elasticidad.

La potencia máxima (N_{emáx}) y el torque máximo (M_{emáx}), que brindan los fabricantes, los afectamos por un coeficiente de corrección (K_c), que toma en cuenta las normas de los ensayos de motores, que para ambos motores sus valores coinciden K_c = 0.955:

$$N_{emáx} = N_{emáxfabricante} \cdot K_c \text{ (kW)}; M_{emáx} = M_{emáxfabricante} \cdot K_c \text{ (N.m)} \tag{1}$$

Las frecuencias de rotación en rpm de potencia máxima (n_N) y torque máximo (n_M) se convierten a 1/s, y son designadas correspondientemente como W_N y W_M.

$$W_N = n_N \cdot \pi/30 \text{ (1/s)}; W_M = n_M \cdot \pi/30 \text{ (1/s)}. \tag{2}$$

Dadas las características de funcionamiento del motor IVECO (ver tabla 2), se asume como W_N, la máxima frecuencia de rotación a potencia constante y como W_M, la mínima frecuencia de rotación a torque máximo, de forma que los coeficientes de elasticidad, mantengan su concepción inicial. De tal forma:

Tabla 2. Parámetros de salida de los motores acondicionados para el cálculo.

Parámetro	IVECO Cursor 13	Weichai 615.44
Nem _{max} , kW	337,12	225.38
WN, 1/s	261,80*	230.38
Mem _{max} , N.m	2101,00	1193.75
WM, 1/s	104,72*	157.08
WN-WM	157.07	73.30

Fuente: Elaboración propia.

Note que existe una diferencia notable en potencia y torque entre ambos motores, favorable al motor original, que debe marcar el comportamiento cinemático y dinámico del vehículo original en relación con el remodelado. Ello excluye la necesidad de realizar análisis de resistencia de materiales en el sistema de transmisión. El motor Weichai 615.44 exhibe frecuencia de rotación más alta a torque máximo, pero menor a potencia máxima, y, por tanto, menor frecuencia de rotación máxima.

El rango fundamental de trabajo del motor, que es el comprendido entre la potencia máxima (WN) y torque máximo (WM), el cual determina la elasticidad de frecuencia de rotación del motor, es sensiblemente mayor en el motor original. Esto debe incidir favorablemente sobre sus cualidades dinámicas y se verá reflejado en los indicadores que determinan la relación motor-sistema de transmisión. La tabla 3, muestra los coeficientes de elasticidad de ambos motores.

Tabla 3. Índices de elasticidad de los motores.

Índices de elasticidad		IVECO Cursor 13	Weichai 615.44
Elasticidad de torque	$e_M = M_{em\max} / M_{eN}$	1,63	1.22
Elasticidad de frecuencia de rotación	$e_n = W_N / W_M$	2,50	1.47
Elasticidad total	$E = e_M \cdot e_n$	4,08	1.79
Coefficiente de adaptabilidad	$\Delta_{Me} = (e_M - 1) \cdot 100$	63,16	22.03

Fuente: Elaboración propia.

- El IVECO exhibe mayor elasticidad de torque y de frecuencia de rotación. Esto lógicamente marca la diferencia en elasticidad total y coeficiente de adaptabilidad.
- La elasticidad de frecuencia de rotación en el motor original rebasa todos los estándares establecidos ($e_n = 1.3-2.0$), dado que tanto el $M_{em\max}$ como la $N_{em\max}$ se mantienen constantes en un amplio rango de frecuencias de rotación. Esto le confiere al vehículo original mejores cualidades dinámicas con igual sistema de transmisión, en comparación con el vehículo remodelado
- La elasticidad de torque del motor original supera sensiblemente también los estándares ($e_M = 1.05-1.15$). Esto debe favorecer su estabilidad de movimiento ante cargas variables.
- No obstante, lo anterior, como motor diésel convencional, el Weichai tiene buena elasticidad de torque, superior a los estándares de su clase que alcanzan en diésel el 1.15.

2).-Su característica exterior de velocidad

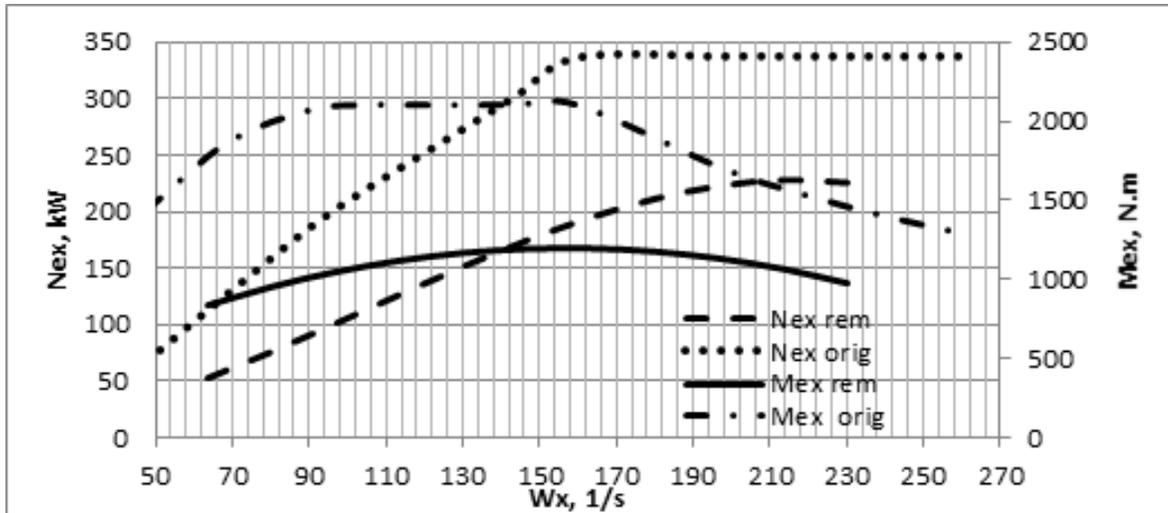
Para la construcción de la característica exterior de velocidad se parte de definir el rango de trabajo del motor, es decir, desde la frecuencia de rotación mínima estable hasta la frecuencia de rotación máxima, y se calcula el torque y la potencia para 10 valores contemplados dentro del mismo.

Tanto el torque como la potencia se calculan por modelos, que pueden ser diferentes en dependencia del tipo de motor. En lo fundamental:

$$M_{ex} = f(M_{eN}, W_x, a, b, c); N_{ex} = f(N_{em\acute{a}x}, W_x, a, b, c),$$

donde W_x es la frecuencia de rotación a la cual se determinará la potencia o el torque y los coeficientes a, b y c son funciones de los coeficientes de elasticidad. De tal forma, se calculan teóricamente las características exteriores de velocidad de ambos motores, que se muestran en la figura 1.

Fig 1. Características exteriores de velocidad del motor original y el propuesto en la remodelación.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura pueden apreciarse: 1). -los mayores indicadores de salida del motor original (potencia y torque) en todo el rango de frecuencias de rotación; 2). -el comportamiento del torque y la potencia en el motor original, atípico en relación con los motores convencionales. El control electrónico de la inyección implica mayor precisión en la dosificación, empleo de múltiples inyecciones, ajuste del tiempo de inyección, sensores que registran el comportamiento del motor, todo lo cual permite mayores posibilidades de ajuste de los parámetros de salida a las necesidades, lo cual unido a los mejores indicadores de elasticidad, debe incidir en las mejores cualidades de explotación del vehículo original.

3).-La característica tractiva del vehículo y los indicadores que evalúan la relación motor-sistema de transmisión.

La característica tractiva es un gráfico de fuerza tractiva (P_{tx}) contra velocidad de movimiento (V_x), donde se incluye una dependencia de la fuerza tractiva ideal (P_{tid}), es decir, la fuerza tractiva de un motor que entrega $N_{em\acute{a}x}$ constante para toda frecuencia de rotación.

$$P_{tx} = \frac{M_{ex} \cdot \eta_o \cdot \eta_s}{r_d \cdot i_{ci}}; P_{tid} = \frac{N_{em\acute{a}x} \cdot \eta_o \cdot 10^3}{V_x} \cdot V_x = W_x \cdot r_d \cdot i_{ci} \tag{3}$$

La eficiencia mecánica de la transmisión se calcula, según Pérez Gálvez (2007) por:

$$\eta_o = \chi - \frac{(2+0.09 \cdot V_x) \cdot G \cdot r_d \cdot i_{ci} \cdot 10^{-3}}{M_{ex}} \tag{4}$$

Dónde:

χ -considera la incidencia en la eficiencia de la cantidad de pares de engranes rectos transmitiendo potencia en la caja de velocidad(k), en los pares cónicos del puente motriz (l), en las barras de transmisión cardánica transmitiendo potencia (m) y en los cojinetes en árboles que transmiten potencia (n).

G – es el peso con carga del camión, N

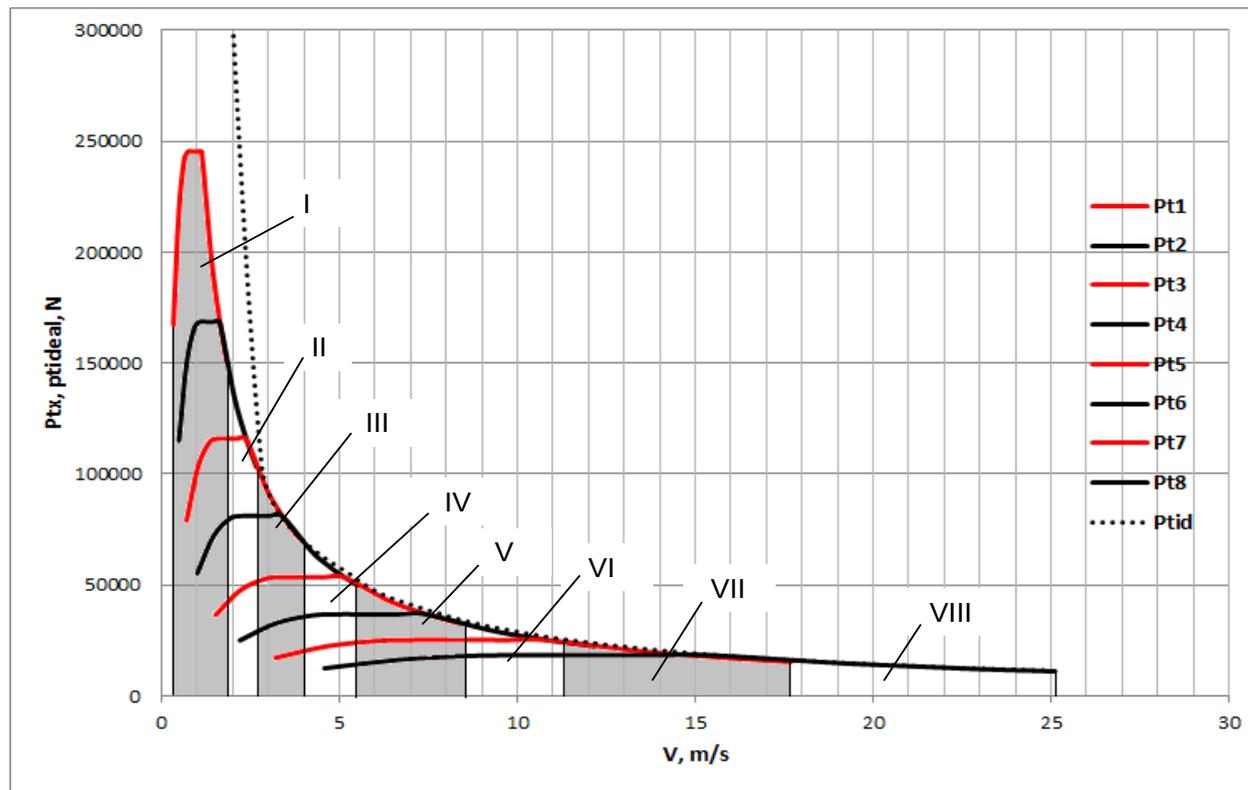
El coeficiente X se calcula por la siguiente expresión

$$\chi = 0.98^k \cdot 0.97^l \cdot 0.995^m \cdot 0.997^n \quad (5)$$

Los valores de k, l, m y n para los diferentes tipos de vehículos, con diferentes fórmulas de ruedas y sistemas de transmisión, se obtienen de una tabla elaborada al efecto.

En la característica tractiva del vehículo original (Figura 2), las dos primeras marchas se encuentran separadas de la característica ideal, mientras el resto de las marchas se ajustan perfectamente a esta.

Fig 2. Característica tractiva del vehículo original.

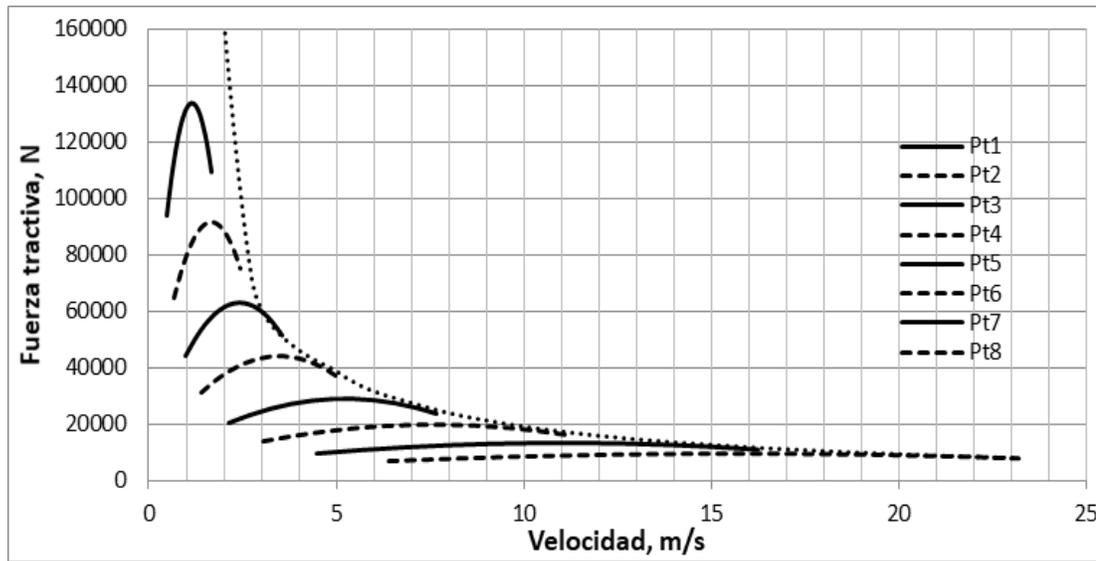


Fuente: Guerra, 2018.

Aunque esto afecte las áreas de ausencia de potencia, estas son marchas generalmente transitorias, usadas en forma momentánea, para lograr el adecuado cambio de marcha. No obstante, debe existir buen aprovechamiento del área ideal. El comportamiento de las curvas reales de fuerza tractiva augura altos valores de selectividad. Las velocidades reales, deben ser superiores en el vehículo original, tanto por su mayor valor de frecuencia de rotación a potencia máxima como por su mayor torque en todo el rango de frecuencias de rotación. El solape entre marchas se aprecia adecuado en ambos vehículos, aunque debe ser ligeramente mayor en el vehículo original.

En el vehículo remodelado (Figura 3) también se produce una cierta separación de las curvas reales de la 1ra y 2da marcha en relación con la curva ideal. En el resto de las marchas el comportamiento es normal. No deben existir dificultades ni con el aprovechamiento de las áreas de ausencia de potencia, ni con el solape ni la selectividad.

Fig 3. Característica tractiva del vehículo remodelado.



Fuente: Guerra, 2018.

A continuación, se calculan los indicadores que valoran la relación motor-sistema de transmisión. Dadas las características del motor IVECO Cursor 13, con un rango de frecuencias de rotación a torque constante, para el cálculo del coeficiente de aprovechamiento del área ideal, hay que dividir la característica en 3 rangos de frecuencia de rotación, y así determinar el área bajo en cada una de las 8 marchas por integración y comparar con la curva ideal. En la figura 2, a modo de ejemplo, se muestran enmarcadas las 8 áreas bajo la curva que se van a calcular en el caso del vehículo original, para determinar el área real sumaria. En el caso del motor Weichai se emplean las ecuaciones convencionales para el cálculo del área bajo la curva real.

Los indicadores que evalúan la relación motor-sistema de transmisión (Millo, 2003; Pérez, 2007; Pérez et al, 2010) son los siguientes:

El coeficiente de aprovechamiento del área ideal (S_a), el cual valora la cuantía de las áreas de ausencia de potencia en relación con el área ideal.

$$S_a = (A_{real} / A_{id}) \cdot 100 \tag{6}$$

Dónde:

Areal –es el área efectiva debajo de las curvas reales de fuerza tractiva

Aid – es el área bajo la curva de fuerza tractiva ideal

$$A_{real} = \int_{V_{minI}}^{V_{maxI}} P_{txI} \cdot dV + \int_{V_{maxI}}^{V_{maxII}} P_{txII} \cdot dV + \int_{V_{maxII}}^{V_{maxIII}} P_{txIII} \cdot dV + \dots + \int_{V_{max\ i-1}}^{V_{max\ i}} P_{k\ i} \cdot dV \tag{7}$$

Dónde:

$P_{txi}, P_{txi'}, P_{txii} \dots$ - son las fuerzas tractivas en las marchas i, 1ra, 2da, ...

$V_{maxi'}, V_{maxi}, V_{maxii} \dots$ son las velocidades máximas en las marchas i, 1ra, 2da, ...

V_{mini} –es la velocidad mínima estable en 1ra marcha

El área bajo la curva ideal se determina según:

$$A_{id} = \int_{V_{min I}}^{V_{máxms}} P_{tid} \cdot dV = \int_{V_{min I}}^{V_{máxms}} \frac{N_{emáx} \cdot \eta_{oid} \cdot \rho^3}{V} \cdot dV \tag{8}$$

Dónde:

$V_{máxms}$ –es la velocidad máxima en marcha en marcha superior

El coeficiente de recubrimiento (S_o), que valora el solape entre marchas y no es más que la relación entre la sumatoria del rango de velocidades que se solapan entre cada dos marchas contiguas $\sum \Delta V$ y la sumatoria de los rangos de variación de las velocidades en cada marcha $\sum \Delta V_T$:

$$S_o = \sum \Delta V / \sum \Delta V_T = \sum_{i=2}^m (V_{max i-1} - V_{min i}) / \sum_{i=1}^m (V_{max i} - V_{min i}) \tag{9}$$

Dónde:

$V_{máxi}$, $V_{máxi-1}$ -velocidades máximas en la marcha i y en la precedente a i, respectivamente.

V_{mini} - es la velocidad mínima estable en la marcha i

En el caso de la selectividad, se define el **coeficiente de selectividad (S_e)**, como el aprovechamiento de las posibilidades tractivas entre el rango de variación de la fuerza tractiva:

$$S_e = \frac{(P_{k max I} - P_{v max m}) - \sum_{i=2}^m (P_{v max i-1} - P_{k max i})}{P_{k max I} - P_{v max m}} \cdot 100 \tag{10}$$

Dónde:

$P_{tv máxms}$, $P_{tv máxi}$ – es la fuerza tractiva a la velocidad máxima en marcha superior y en una marcha i cualquiera, respectivamente.

$P_{tx máxi}$, $P_{tx máxi}$ - es la fuerza tractiva máxima en 1ra marcha y en una marcha cualquiera i.

En la tabla 4, se muestran los resultados del cálculo de los coeficientes relacionados en ambos vehículos, comparados con los estándares establecidos por Mirabal (2015), diferentes para el vehículo original y el modificado, en una amplia base de datos de vehículos pesados.

Tabla 4. Coeficientes que evalúan la relación motor-sistema de transmisión en ambos vehículos.

Indicador	Vehículo original		Vehículo modificado	
	Calculado	Estándar	Calculado	Estándar
Sa	70.58	76.08	81.98	82.91
So	60.58	67.61	55.67	56.82
Se	120.13	56.91	53.98	47.26

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al coeficiente de aprovechamiento del área ideal:

- En el vehículo original, el coeficiente brinda resultados menores que los estándares en un -7.79%. Se obtiene una buena adecuación a la característica ideal desde la marcha 3ra a la 8va, pero la separación en las marchas 1ra y

2da en relación con la ideal, afecta los resultados generales, dada la importancia que tiene la característica real de 1ra marcha en la determinación del coeficiente.

- La diferencia que se establece con el estándar en el vehículo remodelado, es de -1.13%, lo cual se considera favorable, pues se encuentra en el rango de $\pm 5\%$, considerado como adecuado.
- En valores absolutos el vehículo remodelado posee mayor coeficiente que el vehículo original.

En cuanto al coeficiente de recubrimiento:

- Tanto en el vehículo original como en el remodelado, el coeficiente brinda resultados menores que los estándares.
- La diferencia es mayor en el caso del vehículo original (-11.59%), en lo cual incide su mayor rango de frecuencias de rotación y el comportamiento de las curvas de 1ra y 2da marcha, que son marchas intermedias, por lo cual se considera no dificulte el confort en los cambios de marcha.
- En el vehículo remodelado la diferencia es pequeña (-2.06%), valor que se encuentra dentro del $\pm 5\%$ que se considera adecuado.

En cuanto al coeficiente de selectividad:

- En ambos vehículos se logran mayores valores que en el estándar, siendo muy superiores en el vehículo original dado la forma de su curva de torque, que incide directamente en la de fuerza tractiva. En este caso se logra un montaje entre curvas de marchas consecutivas, que garantiza valores mayores del 100%.
- Este coeficiente tiene gran incidencia en el consumo y en la posibilidad de alcanzar mayores velocidades de movimiento.
- No obstante, el coeficiente de selectividad alcanza altos valores en el vehículo remodelado (+12%).

4).-El análisis del comportamiento del consumo de combustible en los regímenes más adecuados de movimiento en las marchas superiores en diferentes variantes de composición.

Los cálculos de consumo de combustible se realizarán en su marcha superior solamente, por cuanto se trata de una marcha directa. Para simplicidad del cálculo teórico, el mismo se realiza en el indicador de consumo recorrido (Q, L/100.km). Para ello utilizaremos la conocida expresión (Fuentes et al, 2015):

$$Q = \frac{g_e \cdot N_{e \text{ nec}}}{36 \cdot \rho_c \cdot V_x} \text{ (L/100.km)} \quad (11)$$

dónde:

g_e – es el consumo específico de combustible en característica parcial, g/kW.h

$N_{e \text{ nec}}$ – es la potencia necesaria para vencer la resistencia sumaría al movimiento, kW

ρ_c – es la densidad del combustible, kg/L

El consumo específico, según el método teórico más ampliamente aceptado, se determina para característica parcial de velocidad por la siguiente expresión: $g_e = g_{eN} \cdot K_A \cdot K_n$ (12)

dónde:

g_{eN} - consumo específico de combustible para potencia máxima del motor (g/kW.h)

K_n, K_A - coeficientes que consideran la variación de g_e en función de la frecuencia de rotación del cigüeñal y del grado de aprovechamiento de la potencia del motor, respectivamente.

Los coeficientes K_A y K_n , pueden determinarse por las siguientes expresiones experimentales:

$$K_A = 1.7977 \cdot A_p^3 + 1.8734 \cdot A_p^2 - 6.2614 \cdot A_p + 3.6189 \quad (13)$$

A_p es el coeficiente de aprovechamiento de la potencia, el cual se determina para una marcha determinada como:

$$A_p = \frac{P_{tnec}}{P_{Tx}} \tag{14}$$

Donde: P_{tnec} – es la resistencia sumaría al movimiento

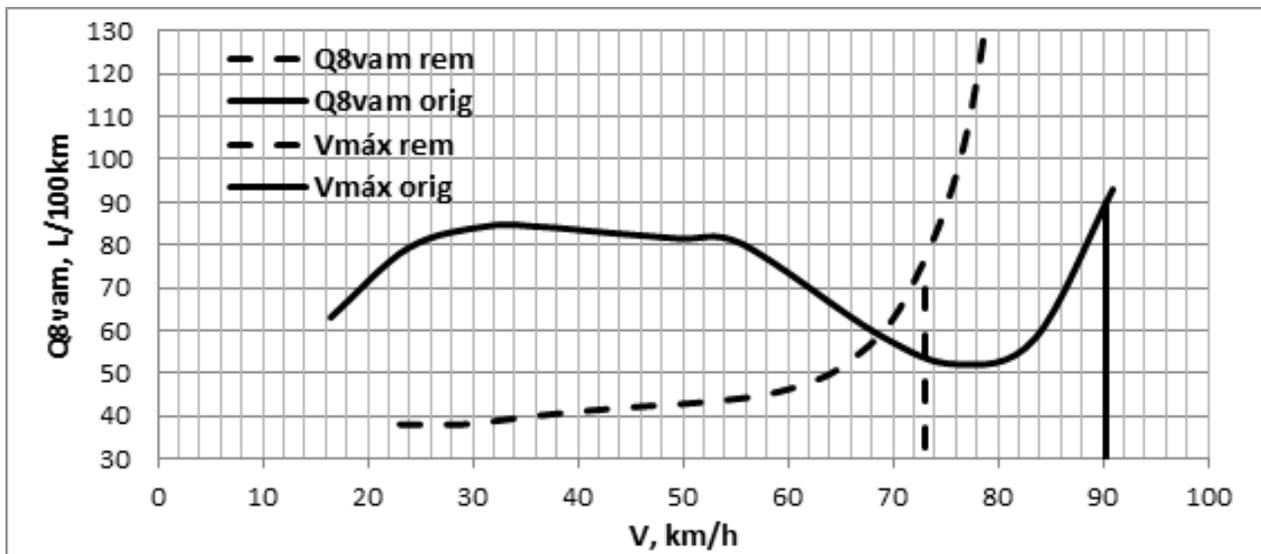
$$K_n = 0.2991 \cdot \left(\frac{W_x}{W_N}\right)^3 + 0.0 \cdot \left(\frac{W_x}{W_N}\right)^2 - 0.3 \cdot \left(\frac{W_x}{W_N}\right) + 1.2025 \tag{15}$$

Por su parte, la potencia necesaria para vencer la resistencia sumaria al movimiento, se calcula según:

$$N_{enec} = \frac{P_{tnec} \cdot V_x}{10^3 \cdot \eta_0} \tag{16}$$

La figura 4 muestra el comportamiento del consumo recorrido en el vehículo original y el remodelado, en la 8va marcha. En la misma, se muestran unas líneas verticales, que indican la velocidad máxima para cada vehículo: la línea discontinua para el vehículo remodelado y la continua para el original.

Fig 4. Comportamiento del consumo recorrido en 8va marcha para ambos vehículos.



Fuente: Elaboración propia.

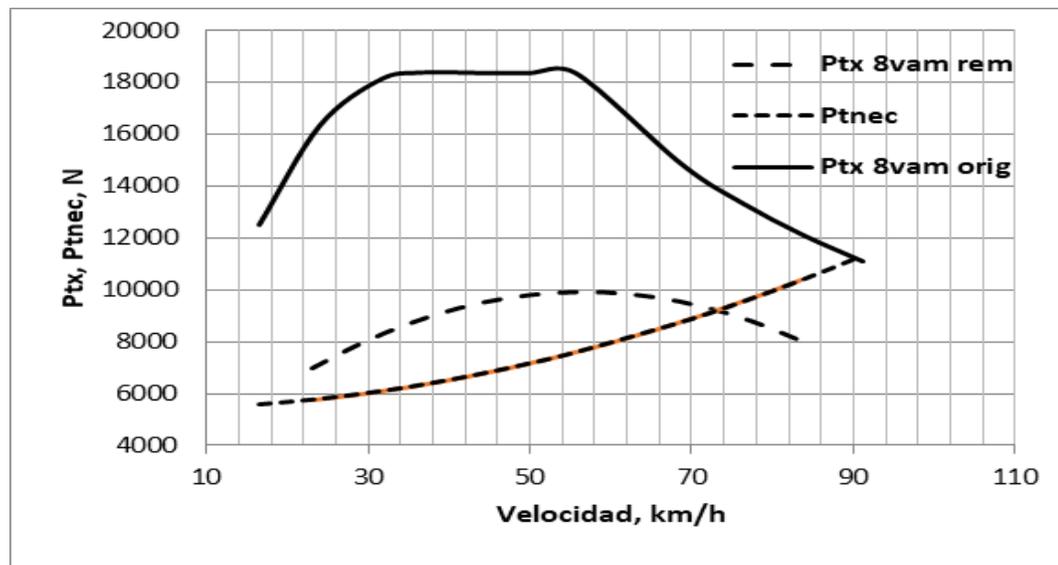
Debido a la forma de la curva del torque en el motor original, apreciable en la figura 1, en un determinado rango de velocidades el coeficiente de aprovechamiento de la potencia es bajo, y por ello, el consumo es mayor en el vehículo original que en el remodelado. Para velocidades por encima de los 68 km/h, se hace menor en el vehículo original debido a favorables valores del coeficiente de aprovechamiento de la potencia. Debido a los menores indicadores de salida, la velocidad máxima del vehículo remodelado es menor.

En el vehículo original, los menores valores de consumo recorrido se alcanzan para velocidades entre 20 m/s (72 km/h) y 23 m/s (82.8 km/h) con A_p entre 0.60 a 0.848, lo cual se corresponde con los rangos que la bibliografía establece para alcanzar los mínimos valores de consumo de combustible. El menor consumo recorrido se alcanza para la velocidad de 79 km/h (52.07 L/100km) con un coeficiente de aprovechamiento de la potencia $A_p = 0.70$

En el vehículo remodelado, la característica de consumo recorrido en este vehículo es prácticamente ascendente, razón por la cual no puede hablarse de un consumo mínimo. Para un amplio rango de velocidades de movimiento, el vehículo remodelado alcanza menores valores del indicador de consumo recorrido, dado sus mayores A_p .

Para lograr mayor claridad, a continuación, para ambos vehículos, original y remodelado, en la figura 5 se muestra el comportamiento en 8va marcha de la fuerza tractiva y la resistencia sumaria, en forma gráfica. En la misma se aprecia que, en 8va marcha, para gran parte del rango de velocidades de movimiento el vehículo original presenta apreciable mayor reserva de fuerza tractiva que el vehículo remodelado. Por esta razón sus coeficientes de aprovechamiento de la potencia en un amplio rango de velocidades de movimiento son relativamente bajos, lo que provoca la elevación del consumo.

Fig 5. Balance de fuerza tractiva y resistencia sumaria para ambos vehículos en 8va marcha.



Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, dado que el rendimiento tiene gran incidencia en los costos, independientemente del costo del combustible, que es un elemento dentro de los costos de operación, el vehículo original puede alcanzar en la marcha superior velocidad máxima de 90.5 km/h (25.14 m/s), superior a la máxima posible en el vehículo remodelado: 73 km/h (20.28 m/s).

Esta valoración se realiza en condiciones críticas, es decir, para las cargas máximas (carga útil de 30t), por lo que con cargas más moderadas el vehículo remodelado puede alcanzar mayores velocidades.

5).-Principales indicadores cinemáticos y dinámicos de la máquina automotriz

Como parámetros que identifican las cualidades dinámicas del vehículo se determinan diferentes indicadores vinculados a su capacidad de aceleración con carga y la pendiente que puede vencer el vehículo partiendo del reposo en 1ra marcha (Alghassab et al, 2016; Habib, 2014; Jensen et al, 2021; Ribeiro et al, 2019).

Las capacidades máximas de aceleración se determinan por optimización. La pendiente que puede ascender partiendo del reposo y la capacidad de aceleración a 60 km/h en marcha superior se determinan por tradicionales métodos dinámicos (Hu et al, 2019). En la tabla 5 se muestran los resultados de los cálculos para el vehículo original y el remodelado. Como es de suponer los parámetros dinámicos del vehículo original son superiores a los del vehículo remodelado: mayor capacidad de aceleración en diferentes condiciones y mayores pendientes a ascender a partir del reposo. No obstante, si partimos de las grandes cargas para las cuales se calculan estos parámetros podemos evaluar de satisfactorios también los resultados alcanzados por el vehículo remodelado. Con relación a la velocidad máxima de movimiento ya fue valorada en el punto 4.

Tabla 5. Principales indicadores dinámicos.

Parámetro	Vehículo original	Vehículo remodelado
Capacidad máxima de aceleración 1ra marchadV/dtmáx, m/s ²	0.4203	0.2246
Pendiente máxima desde el reposo $\alpha_{\text{máx}}$, grados	32.28	16.58
Capacidad máxima de aceleración en marcha superior dV/dtmáxms, m/s ²	1.7915	0.0724
Capacidad de aceleración a 60 km/h marcha superior dV/dt60 km/h, m/s ²	1.1813	0.0448

Fuente: Elaboración propia.

6).-Valorar posibles afectaciones en las cualidades de estabilidad y frenado.

Como no existe una diferencia sensible de peso entre el motor original y el remodelado, no existe necesidad de realizar comprobaciones de estabilidad, pues para las grandes cargas que soporta el conjunto, cualquier variación de peso en el motor, no altera sensiblemente las reacciones en los apoyos ni las coordenadas del centro de gravedad.

De igual modo, dado que el vehículo original estaba concebido para transportar las grandes cargas que se han empleado en los cálculos precedentes, siendo las velocidades posibles de movimiento menores en el vehículo remodelado que en el original, y no existiendo variaciones sensibles de carga en los puentes ni de las coordenadas del centro de gravedad con el cambio de motor, no existe necesidad de realizar comprobaciones de cualidades de frenado.

7).-Desarrollar cálculos de resistencia de materiales, si fuera necesario

La remotorización se realiza sin necesidad de realizar modificaciones constructivas, por lo que resulta innecesario realizar cálculos de comprobación de resistencia en la remodelación.

Los elementos del sistema de transmisión en el vehículo remodelado estarán sometidos a menores cargas que en el vehículo original, dado los menores parámetros de salida del motor Weichai 615.14, por lo que resulta innecesario realizar recálculos de conjuntos del sistema de transmisión.

CONCLUSIONES

La metodología, aun cuando puede perfeccionarse, posibilita la evaluación de la factibilidad técnica de la remotorización.

A pesar de que decrecen las cualidades dinámicas en el vehículo remodelado, la remodelación propuesta es factible técnicamente, no representando un problema para la circulación vehicular. El vehículo remodelado puede

cumplir sus funciones, aún en las peores condiciones de carga.

Lo anterior se hace más patente, cuando se recuerda que el análisis anterior se ha realizado para un vehículo en condiciones extremas de carga (30 t de carga útil y más de 44 t de peso total), lo que asegura mejores condiciones de movimiento, para condiciones de carga menos exigentes. En el peor de los casos, la reducción de velocidad de movimiento resulta dentro de límites razonables para vehículos con tales condiciones de carga.

Como se reducen los parámetros de salida del motor, no se modifica sistema de transmisión, peso ni estructura del vehículo, se prescinde, por tanto, de los análisis de estabilidad, frenados y resistencia mecánica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alghassab, M., Mahmoud, A., & Zohdy, M. (2016). Controlling Ground Vehicle Nonlinear Dynamics by the Use of Automobile Traction Models. In *Proceedings* (pp. 1260–1266). Detroit, Michigan, USA: IEOM Society International. <http://ieomsociety.org/ieomdetroit/pdfs/340.pdf>
- Fuentes Vega, J. R., Cogollos Martínez, J. B., Millo Carmenate, V. & Pérez Gálvez, R. (2015). Modelación matemática de ciclos de viaje e indicadores dinámicos y de consumo para vehículos pesados. In *Ponencia*. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad México.
- Guerra Pérez, R. (2018). *Perfeccionamiento de la metodología de remodelación vehicular* (Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez,” Cienfuegos, Cuba.
- Jensen, K.M., Santos, I.F., Clemmensen, L.K.H., Theodorsen, S., & Corstens, H.J.P. (2021). Mass estimation of ground vehicles based on longitudinal dynamics using IMU and CAN-bus data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 162, 1–21. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327022001091>
- Habib, N. (2014). Vehicle Dynamics Conversion into Power (Dynapower). *Science Direct*, 32–37. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212671614000262>

- Hu, J., Rakheja, S., & Zhang, Y. (2019). Tire-road friction coefficient estimation under constant vehicle speed control. *Science Direct*, 52(8), 136–141. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319303921>
- Huang, W., Wong, J. Y., & Knezevic, Z. (2014). Further study of the optimisation of the tractive efficiency of all-wheel-drive vehicles. *Int. J. Heavy Vehicle Systems*, 21(2), 123–151. <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJHVS.2014.061639>
- Millo Carmenate, V. (2003). *Establecimiento de criterios para la selección y/o comparación de camiones diésel* (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas (Ph.D)). Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.
- Mirabal Consuegra, J. L. (2015). *Coefficientes de evaluación de la relación motor-sistema de transmisión* (Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.
- Pazos Díaz, E. D. (2022). *La capacidad de aceleración y velocidad máxima: herramientas para la evaluación de remodelaciones*. (Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez,” Cienfuegos, Cuba.
- Pérez Gálvez, R. (2007). *Modelación de ciclos de viaje e indicadores dinámicos y de consumo para vehículos pesados* (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas (Ph.D)). Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.
- Pérez Gálvez, R., Fuentes Vega, J. R., Cogollos Martínez, J. B., & Toledo Borrego, A. (2010). Evaluación de la eficiencia energética de vehículos pesados en el ciclo de movimiento básico modificado. *Revista Ingeniería Mecánica*, 13(No. 1), 49–58. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442010000100006
- Pérez García, K. J. (2022). La remotorización y su vínculo con las coordenadas del centro de gravedad y la velocidad mínima de movimiento estable (Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez,” Cienfuegos Cuba.
- Ribeiro, A. M., Moutinho, A., Fioravanti, A. R., & de Paiva, E. C. (2019). Estimation of Tire-Road Friction for Road Vehicles: A Time Delay Neural Network Approach. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 1–13. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-019-2079-y>
- Tamayo Pacheco, J. (2014). El sector transporte terrestre, el uso de la energía y sus impactos en el cambio climático (p. 31). Presented at the UN ClimateChangeConference, Lima, Perú: Osinergmin: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
- Trentadue, C., & Carranza, H. (2014). La eficiencia energética en el transporte, un megayacimiento posible. *Petrotecnica*, 14–37.